(مقالهٔ کوتاه)

بررسی عددی فرآیند کاهش پسا در جریان آرام با استفاده از ریبلت‌های مستطیلی*

امیر حاجی‌خان میرزایی[۱] علیرضا رئوف پناه[۲]

چکیده هدف اصلی در پژوهش حاضر معرفی روشی کارآمد و بدون نیاز به ابزارهای بیرونی جهت کاهش پسای وارد بر اجسام متحرک در سیّالات است. رژیم جریان سیّال آرام در نظر گرفته شده است. ابزار مورد نظر ریبلت‌های مستطیلی می‌باشند که به‌صورت عمود بر حرکت جریان سیّال قرار گرفته‌اند. میدان جریان روی سطوح ریبلت‌دار با استفاده از دینامیک سیّالات محاسباتی در فضای دوبعدی به‌دست‌آمده است. اثر پارامترهای هندسی ریبلت‌ها شامل عرض و ارتفاع و هم‌چنین اندازه سرعت جریان آزاد بر میزان کاهش پسای وارد بر سطوح ریبلت‌دار نسبت به سطح صاف بدون ریبلت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان از کارآمدی روش مذکور در کاهش پسای وارد بر سطح در رژیم جریان آرام دارد. حداکثر کاهش پسا در عرض ریبلت ۰٫۱ میلی‌متر و سرعت جریان آزاد ۱۰ متر بر ثانیه برابر با ۸٫۷ درصد محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی ریبلت؛ آب‌گریز؛ کاهش پسا؛ شبیه‌سازی عددی؛ دینامیک سیّالات محاسباتی.

Numerical Investigation of Drag Reduction Mechanism in Laminar Flow Regime using Rectangular Riblets

A. Haji Khan Mirzaei A. Raoufpanah

Abstract *This paper aims to introduce an efficient and passive method in order to reduce the amount of drag exerted on the surfaces of the objects moving in the water. The flow regime is considered as laminar. The desired method is to use rectangular riblets being perpendicular to the flow direction. Two-dimensional computational fluid dynamics is utilized to resolve the flow field around the ribbed surfaces. The effects of geometrical parameters of riblets including width and height as well as free-stream velocity on the amount of drag reduction are numerically calculated. The numerical results certify the efficiency of rectangular riblets as a drag reduction tool in the laminar flow regime. Maximum amount of the drag reduction is about 8.7% achieved for the riblets width of 0.1 millimeter and at free-stream velocity of 10 m/s.*

Key Words Riblet, Hyrophobic, Drag Reduction, Numerical Simulation, Computational Fluid Dynamics

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۱۲/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۱/۸ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v31i1.79677

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد یادگار امام خمینی (ره)، تهران

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره)، تهران raoufpanah@iausr.ac.ir

مقدّمه

با عبور هر سیّالی از روی یک سطح جامد، از سوی سیّال نیروی مقاومی (پسا) به جسم وارد می‌شود. کاهش میزان این نیرو ازجمله مسائلی است که همواره مورد توجّه پژوهشگران و صنعتگران بوده است. با کاهش میزان این نیرو در کاربردهای مختلفی نظیر کشتی‌ها، لوله‌های انتقال سوخت و نیز هواپیماها، می‌توان میزان مصرف انرژی لازم برای غلبه بر این نیرو را کاهش داد. تاکنون راه‌های مختلفی برای کاهش میزان پسا، هم در گسترهٔ پژوهشی و هم صنعتی، ابداع شده است که برخی به تغییر خصوصیات سیّال و برخی دیگر به تغییر خصوصیات سطح وابسته است. بهبود شرایط سیّال با ایجاد تغییرات در آن ازجمله راه‌هایی است که می‌توان در برخی از کاربردها نظیر انتقال سیّالات در لوله‌ها استفاده کرد ولی در کشتی‌ها و سازه‌های دریایی که کنترلی بر روی سیّال نیست استفاده از این روش ازلحاظ عملی غیرممکن است.

یکی از روش‌های کاهش پسا که نیازی به انرژی ورودی و مواد افزودنی به جریان ندارد، استفاده از ریبلت است [1,2]. ریبلت‌ها درواقع شیارهایی در ابعاد میکرو هستند که می‌توانند در راستای جریان یا عمود بر راستای جریان قرار بگیرند. عملکرد ریبلت‌ها در کاهش میزان پسای اصطکاکی بستگی به ابعاد آنها در مقایسه با ابعاد جریان دارد [3]. سطوح آب‌گریز و فراآب‌گریز نیز با ایجاد یک طول لغزش می‌توانند سبب کاهش میزان پسا شوند [4-6]. روش‌های مختلف کاهش نیروی پسا در تجهیزات دریایی توسط فو و همکاران [7] مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات آزمایشگاهی فراوانی برای بررسی اثر ریبلت‌ها در کاهش پسا انجام شده است. سوزوکی و کاساگی [8] تحقیق جامعی بر روی جریان آشفته در دره ریبلت‌ها انجام داده و مشاهده کردند که انتقال انرژی جنبشی آشفتگی از راستای جریان به راستای عمود بر جریان به دلیل سرکوب گردابه‌های راستای جریان، کاهش می‌یابد. کرامر و همکاران [9] متوجّه شدند که ریبلت‌های موج‌دار می‌توانند اثر بیشتری بر کاهش پسا نسبت به ریبلت‌های مستقیم داشته باشند. سارین و همکاران [10] اثر ریبلت‌ها را بر بال‌واره‌های یک توربین باد بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که اندازه و محل قرارگیری ریبلت‌ها به همراه زاویه حمله بال‌واره و عدد رینولدز بر میزان کاهش پسا اثرگذار هستند. هو و همکاران [11] با استفاده از ابزارهای اپتیکی نظیر تکنیک PIV (Particle Image Velocimetry) و PTV (Particle Tracking Velocimetry) به بررسی ساختارهای سه‌بعدی جریان آشفته بر روی سطح ریبلت‌دار پرداخته و نتایج را با حالت سطح صاف مقایسه کردند. احمد و همکاران [12] با اقتباس از پوست کوسه و برگ سرخس آبی روشی نوین جهت ساخت ریبلت‌های فراآبگریز با استفاده از لیزر ارائه کردند. آنها آزمایش‌ها را برای جریان داخل کانال و در رژیم آشفته انجام دادند. اخیراً روین و همکاران [3] اثر استفاده از ریبلت به همراه پوشش فرا آب‌گریز را در جریان داخل کانال بررسی کردند. آنها سه اندازه مختلف برای ریبلت‌ها در نظر گرفتند که شامل ریبلت کوچک (کمترین کاهش پسا)، ریبلت بهینه (بیشترین کاهش پسا) و ریبلت بزرگ (افزایش پسا) است.

شبیه‌سازی‌های عددی نیز به لطف توسعه ابزارهای محاسباتی و پیشرفت رایانه‌ها، در خدمت محقّقان قرار گرفته است تا اثر ریبلت‌ها بر کاهش پسا را به‌طور جامع‌تری بررسی نمایند. در این میان استفاده از روش «حل عددی مستقیم» به‌عنوان ابزاری قدرتمند مورد توجّه برخی از پژوهشگران قرار گرفته است. چوی و همکاران [13] اثر ریبلت‌ها بر کاهش پسا در یک کانال را با روش «حل عددی مستقیم» بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که ریبلت‌ها باعث کاهش نوسانات سرعت و چرخش و همچنین کاهش تنش‌های رینولدزی می‌شوند. جریان آشفته بر روی شیارهای مستطیلی داخل یک کانال با استفاده از روش حل

عددی مستقیم توسط هانگ و همکاران [14] مورد بررسی قرار گرفته است. آنها حرکت و تغییرات گردابه‌های نزدیک دیوار در راستای جریان را مورد تحلیل قرار دادند. آنها از معیار قدرت چرخش برای مطالعهٔ کمّی گردابه‌ها بهره جستند. آنها به این نتیجه رسیدند که شعاع گردابه‌ها در کانال‌های شیاردار کوچک‌تر از کانال‌های صاف است. هم‌چنین، هانگ و همکاران در پژوهش دیگری [15] اثر محلول فعال سطحی را نیز بر جریان آشفته بر روی شیارهای مستطیلی مورد بررسی قرار دادند. ساساموری و همکاران [16] به مطالعهٔ پارامتری ریبلت‌های سینوسی برای کاهش پسا با استفاده از روش حل عددی مستقیم پرداختند. آنها جریان کاملاً توسعه یافته آشفته داخل کانال را در عدد رینولدز اصطکاکی ۱۱۰ شبیه‌سازی کرده و مشاهده کردند که بیشینه درصد کاهش پسا برابر با ۹٫۸ درصد خواهد بود. هم‌چنین تحقیق دیگری توسط فوآد و پراکاش [17] برای بررسی اثر ساختارهای سینوسی در کاهش پسای جریان آشفته داخل کانال به‌صورت روش حل عددی مستقیم انجام شده است.

علاوه بر روش حل عددی مستقیم، از مدل‌های آشفتگی نیز جهت شبیه‌سازی جریان بر روی ریبلت‌ها استفاده شده است. کلامپ و همکاران [18] با استفاده از روش «شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ» به این نتیجه رسیدند که ریبلت‌ها ابزار کارآمدی در تعدیل ساختارهای آشفتگی سه‌بعدی نظیر گردابه‌های راستای جریان، «گردابه‌های سنجاق‌سری» و «گردابه‌های گاما» هستند. بای و همکاران [19] با استفاده از مدل آشفتگی SST k-ω عملکرد شش نوع ریبلت با هندسه‌های مختلف را در کاهش میزان پسا بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که ریبلت L شکل بهترین عملکرد را داشته و تا ۵٫٦۳٦ درصد می‌تواند پسای اصطکاکی را کاهش دهد. بیون و پارک [20] اثر ریبلت‌ها با اشکال هندسی مختلف (شامل مثلثی و مستطیلی) را در کاهش میزان پسا در رژیم جریان آرام به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت ابعادی ریبلت‌ها، ضریب اصطکاک محلی کاهش می‌یابد.

گرچه اکثر پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثر ریبلت‌ها مربوط به جریان توبولانس است اما چوی و همکاران [21] اثر ریبلت‌های V شکل طولی را در جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته داخل کانال، به‌صورت عددی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که بر خلاف حالت جریان آشفته، وجود ریبلت‌های طولی باعث کاهش پسا در جریان آرام نمی‌شود. در واقع اگرچه نرخ برش روی دیواره در بیشتر بخش‌های سطح ریبلت‌دار نسبت به کانال صاف کاهش می‌یابد اما در نهایت پسا افزایش خواهد یافت. پژوهش‌های عددی دیگری نیز در زمینه عملکرد ریبلت‌ها در کاهش میزان پسا انجام شده است [22,23].

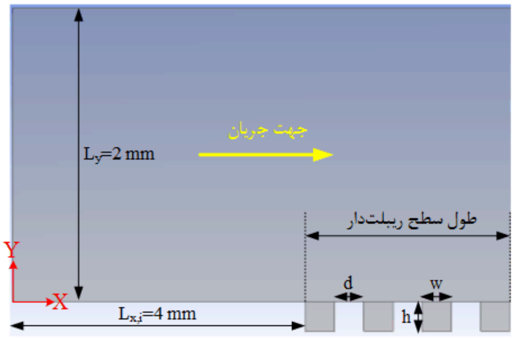
با توجّه به موارد بیان‌شده، اهمّیّت استفاده از ریبلت‌ها در کاهش پسای وارد بر تجهیزات هوایی و دریایی نظیر راکت‌ها، کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و اژدرها مشخص گردید. هدف اصلی در این پژوهش بررسی اثر استفاده از سطوح ریبلت‌دار بر کاهش میزان پسای وارد بر یک صفحه مسطح با استفاده از ابزار دینامیک سیّالات محاسباتی است. بر خلاف اکثر پژوهش‌های پیشین که بر جریان آشفته تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش کاهش پسا در جریان آرام مد نظر است. هم‌چنین بخش اعظم پژوهش‌های گذشته جریان داخل کانال را بررسی کرده‌اند و پژوهش‌های اندکی به بررسی اثر ریبلت‌ها در کاهش پسای وارد بر سطوح (نظیر جریان روی صفحه تخت) پرداخته‌اند. با توجّه به این موارد، در پژوهش حاضر با استفاده از فرضیّات ساده‌شونده، هندسه‌ای دوبعدی در نظر گرفته شده و سپس اثر استفاده از ریبلت‌های مستطیلی با ابعاد مختلف در کاهش میزان پسای وارد بر سطح در رژیم

جریان آرام (لمینار) بررسی شده است. هم‌چنین اثر سرعت جریان آزاد نیز بر عملکرد ریبلت‌ها در کاهش میزان پسا بررسی شده است. نکته بسیار مهم این است که ابعاد ریبلت‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده است که امکان ساخت آنها با توجه به تجهیزات امروزی امکان‌پذیر است.

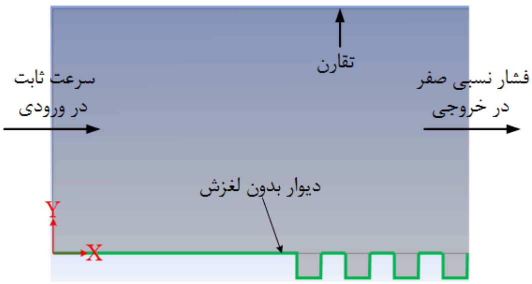
هندسه، شرایط مرزی و معادلات حاکم

صورت‌مسئله در پژوهش حاضر شبیه‌سازی جریان در یک فضای دوبعدی است که در شکل (۱) نشان داده شده است. سطح پایینی فضای محاسباتی در قسمت ابتدایی صاف است تا شبیه اثر جریان روی صفحهٔ تخت را ایجاد نماید. در قسمت انتهایی فضای محاسباتی، ریبلت‌های مستطیلی به‌صورت عمود بر جریان چیده شده‌اند. لازم یادآوری است که به دلیل بهتر دیده شدن ریبلت‌ها مقیاس اندازه‌ها در این شکل رعایت نشده است.

شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای جریان نیز در شکل (۲) نشان داده شده است. در ورودی از شرط مرزی سرعت ثابت (۱۰ متر بر ثانیه) استفاده شده است. فشار نسبی در خروجی صفر است. باید توجّه داشت با توجّه به ثابت بودن چگالی سیّال و فرض تراکم‌ناپذیری، مقدار مطلق فشار تأثیری در حل مسئله ندارد. دیواره پایینی فضای محاسباتی دارای شرط عدم لغزش بوده و در سطح بالایی نیز شرط مرزی تقارن استفاده شده است. شایان یادآوری است برای تولید شبکه محاسباتی از نرم‌افزار «انسیس مشینگ (ANSYS Meshing)» استفاده شده و برای حل میدان جریان از نرم‌افزار «انسیس فلوئنت (ANSYS FLUENT)» بهره گرفته شده است.



شکل «۱»: شماتیکی از فضای محاسباتی و ابعاد هندسی ریبلت‌ها شامل w (عرض)، h (ارتفاع) و d (فاصله).



شکل «۲»: شرایط مرزی جریان.

تمامی معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پایستگی جرم و تکانه به روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و حل شده‌اند. معادلات پایستگی جرم و تکانه به ترتیب توسط روابط (۱ و ۲) بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \qquad (۲)$$

که در روابط بالا ρ، u، p و μ به ترتیب چگالی، سرعت، فشار و گرانروی دینامیکی سیّال هستند. برای ارتباط سرعت و فشار در معادلات پایستگی جرم و تکانه از «روند حل کاپلد» استفاده شده است. هم‌چنین تمامی عبارات جابه‌جایی در معادلهٔ تکانه با روش بادسوی مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند. معیار همگرایی برای باقیمانده معادلات پایستگی جرم و تکانه برابر با $۱۰^{-۶}$ در نظر گرفته شده است. سیّال

کاری آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و گرانروی ۰٫۰۰۱ پاسکال‌ثانیه در نظر گرفته شده است.

لازم به یادآوری است که عدد رینولدز برای جریان روی سطح به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Re_x = \frac{\rho U_\infty L_x}{\mu} \qquad (۳)$$

در این رابطه U_∞ سرعت جریان آزاد بوده و L_x نیز فاصله از ابتدای سطح (مبدأ مختصات) است. به‌این‌ترتیب بزرگ‌ترین عدد رینولدز در انتهای سطح رخ خواهد داد. با توجّه به اینکه طولانی‌ترین سطح در پژوهش حاضر ۹٫۹ میلی‌متر است، بنابراین بزرگ‌ترین عدد رینولدز ۹٫۹×۱۰^۴ خواهد بود که از مقدار ۵×۱۰^۵ که عدد رینولدز بحرانی (گذار از جریان آرام به آشفته) جریان روی سطح است بسیار کوچک‌تر بوده و می‌توان از برقراری جریان آرام روی سطح اطمینان حاصل کرد. البته باید به این نکته اشاره کرد که به دلیل وجود ریبلت‌ها اغتشاشاتی در میدان جریان به وجود می‌آید (نسبت به سطح صاف بدون ریبلت) که می‌تواند باعث گذار از جریان آرام به آشفته در اعداد رینولدز کوچک‌تری شود. ب؛ براین شرایط جریان و هندسه در پژوهش حاضر به‌گونه‌ای انتخاب شده است تا عدد رینولدز جریان کوچک باشد و گذار به جریان آشفته رخ ندهد. این موضوع مجدد در قسمت نتایج نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

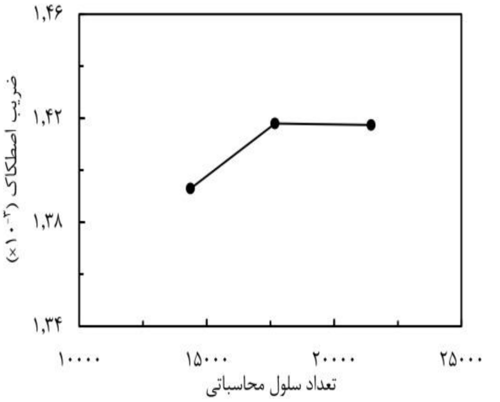
استقلال حل از شبکه و صحت‌سنجی حل عددی

به‌منظور بررسی استقلال حل از شبکه، هندسه دوبعدی مطابق شکل (۱) با عرض، ارتفاع و فاصله ریبلت ۰٫۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سه شبکه محاسباتی مختلف تولید شده و مقادیر ضریب اصطکاک متوسط روی دیوارهٔ ریبلت‌ها برای هرکدام محاسبه شده است. ضریب اصطکاک متوسط مطابق رابطهٔ (٤) تعریف شده است:

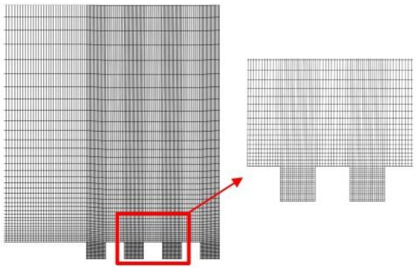
$$\overline{C_f} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \qquad (٤)$$

در این رابطه τ_w مقدار تنش برشی متوسط بر روی دیوارهٔ ریبلت‌دار است. نتایج مربوط به ضریب اصطکاک متوسط روی دیواره ریبلت‌ها در شکل (۳) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد مش از مش شماره ۲ به مش شماره ۳ مقدار ضریب اصطکاک متوسط تنها ۰٫۰۳ درصد تغییر می‌کند (از ۰٫۰۰۱٤۱۸ به ۰٫۰۰۱٤۱۷ کاهش می‌یابد)؛ بنابراین مش شماره ۲ برای سایر شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است زیرا هم از دقت کافی برخوردار بوده و هم در هزینه محاسباتی صرفه‌جویی می‌کند. شایان یادآوری است که در تمامی هندسه‌ها از مش سازمان‌یافته (چهارضلعی) استفاده شده است. نمایی از شبکه محاسباتی تولید شده در شکل (٤) نشان داده شده است.

به‌منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از حل عددی نیاز است تا ابتدا صحت روش حل عددی سنجیده شود. برای این منظور می‌توان نتایج حاصل از حل عددی را با نتایج تجربی یا تحلیلی موجود مقایسه نمود. در پژوهش حاضر به‌منظور سنجش صحت حل عددی، جریان بر روی سطح صاف مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل «۳»: بررسی استقلال حل از شبکه.

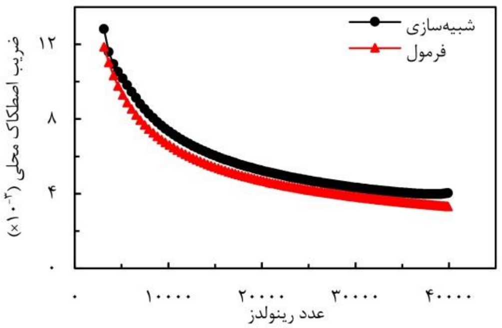


شکل «۱»: نمایی از شبکهٔ محاسباتی تولید شده در مجاورت ریبلت‌ها.

به‌منظور صحت‌سنجی حل عددی مقادیر ضریب اصطکاک بر روی سطح صاف پایینی (قسمت ابتدایی سطح در شکل ۱) از شبیه‌سازی محاسبه شده و با نتایج مربوط به فرمول تحلیلی زیر مقایسه شده است:

$$C_f = 0.664 Re_x^{-0.5} \quad (۵)$$

نتایج مربوط به شبیه‌سازی و فرمول تحلیلی در شکل (۵) با هم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی میان نتایج برقرار است؛ بنابراین صحت روش عددی انتخاب شده تأیید می‌گردد.



شکل «۵»: صحت‌سنجی حل عددی.

نتایج و بحث

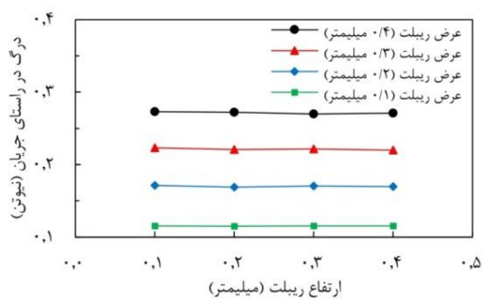
شبیه‌سازی‌ها برای مقادیر مختلف عرض و ارتفاع ریبلت‌ها انجام شده است به‌طوری‌که عرض و ارتفاع ریبلت‌ها از ۰٫۱ تا ۰٫۴ میلی‌متر تغییر داده شده است. فاصله بین ریبلت‌ها (d در شکل ۱) در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت و برابر با ۰٫۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مشخصات هرکدام از ۱٦ هندسه شبیه‌سازی‌شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

در ادامه اثر عرض و ارتفاع ریبلت‌ها در کاهش میزان پسای وارد بر سطح بررسی شده است. لازم به یادآوری است که تمامی مقادیر ارائه شده برای پسای وارد بر سطوح در بخش‌های بعد، مقادیر متوسط پسا است.

اثر ارتفاع ریبلت‌ها. اثر تغییر ارتفاع ریبلت‌ها در کاهش پسای وارد بر سطح در شکل (٦) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تغییر ارتفاع ریبلت‌ها تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر میزان پسای وارد بر سطح ندارد؛ بنابراین نتایج در ادامه تنها برای ارتفاع ریبلت ۰٫۱ میلی‌متر نشان داده شده و از اثر ارتفاع ریبلت صرف‌نظر شده است.

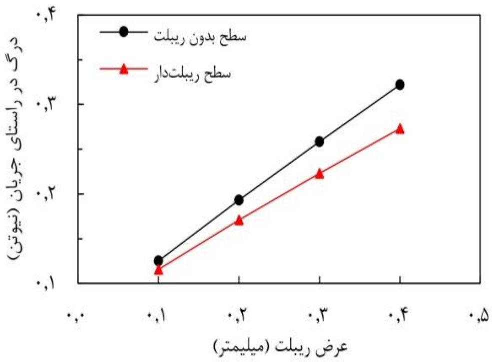
جدول «۱»: مشخصات ابعادی هندسه‌های ریبلت‌ها (ابعاد به میلی‌متر است).

نام	عرض	ارتفاع	نام	عرض	ارتفاع
هندسه ۱	۰٫۱	۰٫۱	هندسه ۹	۰٫۱	۰٫۳
هندسه ۲	۰٫۲	۰٫۱	هندسه ۱۰	۰٫۲	۰٫۳
هندسه ۳	۰٫۳	۰٫۱	هندسه ۱۱	۰٫۳	۰٫۳
هندسه ٤	۰٫٤	۰٫۱	هندسه ۱۲	۰٫٤	۰٫۳
هندسه ۵	۰٫۱	۰٫۲	هندسه ۱۳	۰٫۱	۰٫٤
هندسه ٦	۰٫۲	۰٫۲	هندسه ۱٤	۰٫۲	۰٫٤
هندسه ۷	۰٫۳	۰٫۲	هندسه ۱۵	۰٫۳	۰٫٤
هندسه ۸	۰٫٤	۰٫۲	هندسه ۱٦	۰٫٤	۰٫٤



شکل «۲»: پسای وارد بر سطح در راستای جریان بر حسب ارتفاع ریبلت‌ها.

اثر عرض ریبلت‌ها. اثـر تغییـر عـرض ریبلـت‌هـا در کاهش پسای وارد بـر سـطح در شـکل (۷) نشـان داده شده است. هم‌چنین پسای وارد بر سطح بـدون ریبلـت متناظر نیز در این شکل نشان داده شده اسـت. مشـاهده می‌شود که استفاده از ریبلت اثر قابل قبـولی در کـاهش میزان پسای وارد بر سطح دارد. نتایج نشـان داده شـده در شکل (۷) متناظر با هندسه ۱ تا هندسه ٤ است.



شکل «۷»: پسای وارد بر سطح در راستای جریان بر حسب عرض ریبلت‌ها.

پسای وارد بر سطح در حالت بـدون ریبلـت تنهـا ناشی از اثر تنش برشی (اصطکاک) در سـطح مشـترک سیّال و جامـد اسـت، امـا در حالـت سـطح ریبلـت‌دار بخشی از پسا به دلیل تنش برشـی و بخشـی دیگـر بـه دلیل نیروی فشاری است. مقایسهٔ میان اندازه هرکدام از این نیروها و درصد کاهش پسـا بـا اسـتفاده از ریبلـت مستطیلی در جدول (۲) نشان داده شده است. مشـاهده می‌گردد که جمع پسای فشاری و اصطکاکی در حالـت سطح ریبلت‌دار کمتـر از پسـای اصـطکاکی در حالـت سطح بدون ریبلت متناظر است. کمترین درصد کـاهش پسا در هندسه ۱ با ۷٫۸ درصد و بیشترین میزان کـاهش پسا در هندسه ٤ با ۱۵٫۲ درصد مشاهده می‌گردد. البتّـه باید توجّه داشت که طول سطح ریبلت‌دار در هندسه ۱ تا ٤ مختلف است.

جدول «۲»: مقایسهٔ سهم پسای فشاری و اصطکاکی در سطوح ریبلت‌دار و درصد کاهش پسای سطح ریبلت‌دار نسبت به سطح بدون ریبلت.

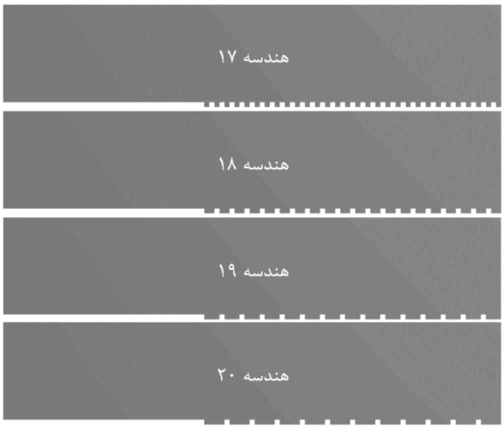
	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
هندسه ۱	بدون ریبلت	–	۰٫۱۲۵۳	۰٫۱۲۵۳	–
	با ریبلت	۰٫۰۳۸٤	۰٫۰۷۷۱	۰٫۱۱۵۵	۷٫۸
هندسه ۲	بدون ریبلت	–	۰٫۱۹۳۱	۰٫۱۹۳۱	–
	با ریبلت	۰٫۰۹۱۲	۰٫۰۷۹۹	۰٫۱۷۱۱	۱۱٫٤
هندسه ۳	بدون ریبلت	–	۰٫۲۵۸۵	۰٫۲۵۸۵	–
	با ریبلت	۰٫۱٤٤۷	۰٫۰۷۸۳	۰٫۲۲۲۹	۱۳٫۸
هندسه ٤	بدون ریبلت	–	۰٫۳۲۱۹	۰٫۳۲۱۹	–
	با ریبلت	۰٫۱۹۹۸	۰٫۰۷۳۲	۰٫۲۷۳۰	۱۵٫۲

با توجّه به اینکه در هر شبیه‌سازی تنهـا ٤ ریبلـت در نظر گرفته شده است (نظیر شکل ۱) بنـابراین طـول سطح ریبلت‌دار در هندسه‌های مختلف متفاوت اسـت. مفهوم طول سطح ریبلـت‌دار در شـکل (۱) نشـان داده شده است. بر ایـن اسـاس طـول سـطح ریبلـت‌دار در هندسه ۱ تا هندسه ٤ به ترتیب برابر با ۰٫۷، ۱٫۱، ۱٫۵ و ۱٫۹ میلی‌متر است.

به‌منظور مقایسه تأثیر ریبلت‌های با عرض مختلـف در کاهش میزان پسا، ٤ هندسه جدیـد بـا طـول سـطح ریبلت‌دار ثابت (برابر با ۵٫۹ میلـی‌متـر) در نظـر گرفتـه شده است. مشخصات این چهار هندسه و شـماتیکی از آنها به ترتیب در جدول (۳) و در شکل (۸) نشـان داده شده است. با توجّه به برابر بودن طول سطح ریبلـت‌دار در این ٤ هندسه، می‌توان مقایسهٔ بهتری میـان عملکـرد ریبلت‌ها در کاهش میزان پسا انجام داد.

جدول «۳»: مشخصات هندسه‌های جدید با طول سطح ریبلت‌دار یکسان (تمام ابعاد به میلی‌متر داده شده است).

نام	طول سطح ریبلت‌دار	عرض ریبلت	تعداد ریبلت
هندسه ۱۷	۵٫۹	۰٫۱	۳۰
هندسه ۱۸	۵٫۹	۰٫۲	۲۰
هندسه ۱۹	۵٫۹	۰٫۳	۱۵
هندسه ۲۰	۵٫۹	۰٫٤	۱۲



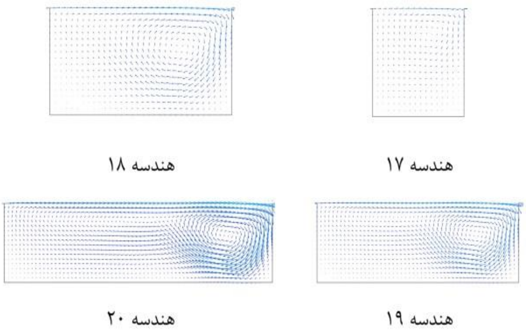
شکل «۳»: شماتیکی از هندسه شماره ۱۷ تا ۲۰.

نتایج مربوط به میزان پسای فشاری، اصطکاکی و کل و هم‌چنین درصد کاهش پسا نسبت به سطح بدون ریبلت متناظر در جدول (٤) آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عرض ریبلت (و در نتیجه کاهش تعداد ریبلت در واحد طول) سهم پسای اصطکاکی کاهش یافته و پسای فشاری افزایش می‌یابد ولی در مجموع پسای وارد بر سطح کاهش می‌یابد.

جدول «٤»: مقایسه سهم پسای فشاری و اصطکاکی در سطوح ریبلت‌دار و درصد کاهش پسای سطح ریبلت‌دار نسبت به سطح بدون ریبلت برای هندسه‌های با طول سطح ریبلت‌دار یکسان.

	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
بدون ریبلت	–	۰/۸۷۳٤	۰/۸۷۳٤	–
هندسه ۱۷	۰/۲۳۷٦	۰/٦۰۹۹	۰/۸٤۷٥	۳/۰
هندسه ۱۸	۰/۳۸۹۱	۰/٤۳۷٤	۰/۸۲٦٥	٥/٤
هندسه ۱۹	۰/٤۸۰٤	۰/۳۳۰٦	۰/۸۱۱۱	۷/۱
هندسه ۲۰	۰/٥٤٤۲	۰/۲٥۲۸	۰/۷۹۷۰	۸/۷

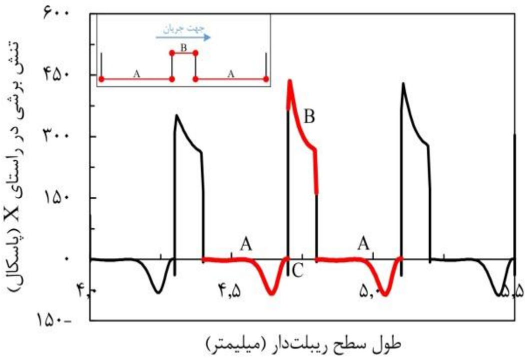
برای بررسی میدان جریان در سطح ریبلت‌دار و فرآیند عملکرد ریبلت مستطیلی در کاهش پسا، بردارهای سرعت در اولین ریبلت برای هندسه شماره ۱۷ تا ۲۰ در شکل (۹) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که بردارهای سرعت در سایر ریبلت‌ها نیز مشابه ریبلت اوّل است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای هر ٤ هندسه گردابه‌ای در داخل ریبلت و در قسمت سمت راست آن به وجود می‌آید. اندازه گردابه در تمامی هندسه‌ها تقریباً ثابت بوده و برابر با ارتفاع ریبلت است به‌گونه‌ای که در هندسه ۱۷ که عرض و ارتفاع ریبلت یکسان و برابر با ۰/۱ میلی‌متر است، گردابه تمام فضای داخل ریبلت را پر کرده اما در هندسه ۱۸ گردابه تقریباً نصف فضای داخل ریبلت را اشغال نموده است. کاهش پسای اصطکاکی با افزایش عرض ریبلت‌ها (که در جدول ٤ قابل‌ملاحظه است) را می‌توان با توجّه به بردارهای سرعت رسم شده در شکل (۹) توضیح داد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در قسمت پایینی ریبلت (دره ریبلت) جهت جریان سیّال به سمت چپ (خلاف جهت جریان اصلی که در راستای مثبت محور X است) است؛ بنابراین پسا اصطکاکی در سطح پایینی ریبلت‌ها در جهت منفی محور X بوده و باعث کاهش میزان پسای اصطکاکی کل در راستای X می‌گردد. به همین دلیل با افزایش عرض ریبلت‌ها میزان سهم پسای اصطکاکی از پسای کل وارد بر سطح کاهش پیدا می‌کند.



شکل «٤»: نمایش بردارهای سرعت در اوّلین ریبلت.

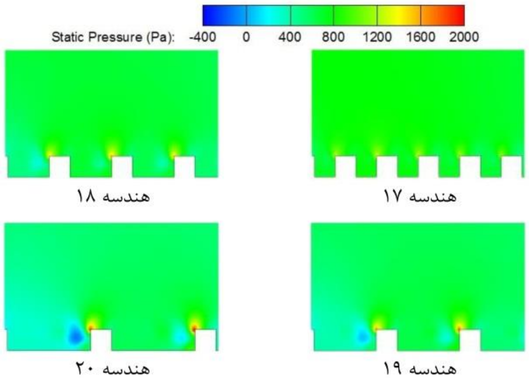
به‌منظور بررسی دقیق‌تر توزیع پسای اصطکاکی، نمودار توزیع مؤلفه تنش برشی در راستای محور X روی سطح ریبلت‌دار در هندسه ۳ (مطابق نام‌گذاری جدول ۱) در شکل (۱۰) رسم شده است. در این شکل

نحوه نام‌گذاری اضلاع ریبلت مشخص شده است. بـر این اساس دره ریبلت با حرف A و قلّه آن با حـرف B نام‌گذاری شده است. همان‌طور کـه ملاحظـه مـی‌شـود مقدار تنش برشـی بـر روی ضـلع A منفـی بـوده و در نتیجـه مقـدار کـل تـنش برشـی در راسـتای محـور X (راستای جریان) را کاهش مـی‌دهـد. هـم‌چنـین تـنش برشی بر روی ضلع B مثبت است؛ بنابراین می‌توان بـه این نتیجه رسید که به علت منفی بودن تنش برشـی در دره ریبلـت‌هـا، برآینـد تـنش برشـی وارده بـر سـطح ریبلت‌دار نسبت به سطح بدون ریبلت کمتر خواهد بود که این موضوع از نتایج نشان داده شده در جدول (۲ و ٤) نیز مشخص است.



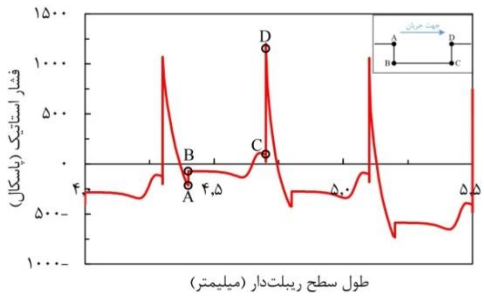
شکل «۱۰»: توزیع تنش برشی در راستای محور X روی سطح ریبلت‌دار در هندسه ۳.

توزیع تغییرات فشار در ابتـدای سـطح ریبلـت‌دار برای هندسه شماره ۱۷ تا ۲۰ در شکل (۱۱) رسم شـده است. مشاهده می‌شود که به دلیل برخورد جریان سیّال به نوک ریبلت‌ها نواحی پرفشاری ایجاد می‌شود کـه در واقع نقطه سکون جریان نیز است. اندازه این فشـار بـه ترتیب از هندسه ۱۷ تا هندسه ۲۰ افزایش می‌یابـد کـه نشان‌دهنده افزایش فشار با افـزایش عـرض ریبلـت‌هـا است. این موضوع در تطابق با نتایج نشان داده شده در جدول (٤) نیز است یعنـی بـا افـزایش عـرض ریبلـت میزان پسای فشاری وارد بر سطح افزایش یافته است.



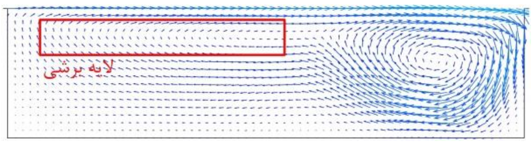
شکل «۱۱»: توزیع فشار روی ریبلت‌ها.

به‌منظور بهتر مشخص شدن نحوه توزیع فشـار بـر روی ریبلت‌ها، توزیع فشار بر روی سطح ریبلت‌دار در هندسه ۳ (مطابق نام‌گذاری جـدول ۱) در شـکل (۱۲) رسم شده است. در این شکل نحوه نـام‌گـذاری چهـار رأس ریبلت با حروف A، B، C و D نشـان داده شـده است. هم‌چنین میزان فشار در ایـن چهـار نقطـه بـرای ریبلـت دوم بـر روی نمـودار مشـخص شـده اسـت. ملاحظه می‌شود که میزان فشار در ضلع میان رئوس A و B (که بر روی ضلع سمت چپ ریبلت قـرار دارنـد) منفی بوده و میزان فشار در ضـلع میـان رئـوس C و D (که در سمت راست ریبلت قرار گرفته‌اند) مثبت است. هم‌چنین فشار در رأس D که نقطه سکون جریان است بسیار بزرگ‌تر از فشار در سایر نقاط است. ایـن رونـد در سایر ریبلت‌ها نیز مشاهده می‌گردد؛ بنـابراین انتظـار می‌رود که نیروی فشاری خالصی به سمت راسـت (در جهت حرکت جریان) به سطح ریبلت‌دار وارد شود کـه مقدار این نیروی فشاری تحت عنوان پسای فشاری در جدول‌های (۲ و ٤) آورده شده است.



شکل «۱۲»: توزیع فشار روی سطح ریبلت‌دار در هندسه ۳.

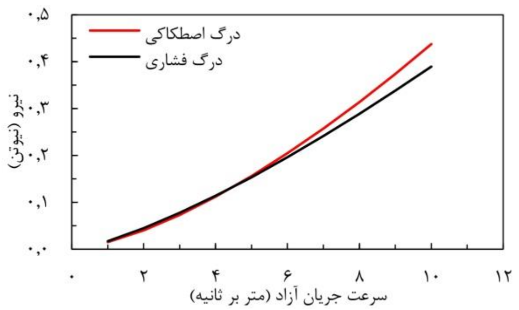
در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش عرض ریبلت‌ها مقدار پسای کل وارد بر سطح، در مقایسه با سطح صاف بدون ریبلت متناظر، کاهش می‌یابد. البته باید به این نکته مهم توجّه نمود که در صورت افزایش عرض ریبلت‌ها از حد معیّنی، ناپایداری‌هایی در حل عددی به وجود می‌آید. این ناپایداری‌ها در نهایت سبب عدم همگرایی حل عددی (با استفاده از فرض جریان آرام) می‌شوند. در واقع می‌توان این موضوع را با توجّه به بردارهای سرعت رسم شده در شکل (۹) نیز توجیه نمود. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش عرض ریبلت‌ها، یک لایه برشی در سمت چپ قسمت داخلی ریبلت‌ها ایجاد می‌شود. منظور از این لایه برشی فضایی در میدان جریان داخل ریبلت است که جهت جریان در ضخامت اندکی به‌طور کامل عکس شده است. برای بهتر مشخص شدن موضوع، این لایه برشی برای هندسه ۲۰ در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.



شکل «۱۳»: نمایش لایه برشی در میدان جریان داخل ریبلت در هندسه ۲۰.

همان‌طور که از بردارهای سرعت نشان داده شده در مشخص است، با افزایش عرض ریبلت‌ها، طول لایه برشی داخل ریبلت مستطیلی افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش عرض ریبلت‌ها از حد معینی، گسترش این لایه برشی سبب توسعه اغتشاشات در جریان شده و رژیم جریان را از حالت آرام به آشفته تبدیل می‌نماید. این موضوع در حل عددی به‌صورت ایجاد ناپایداری در باقیمانده‌ها و عدم همگرایی حل خود را نشان می‌دهد. در نتیجه در این پژوهش عرض ریبلت‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده است تا از وجود جریان آرام اطمینان حاصل شود.

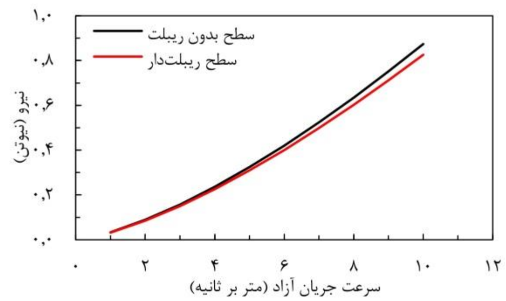
اثر سرعت جریان آزاد. به‌منظور تعیین اثر سرعت جریان آزاد بر روی عملکرد ریبلت‌های مستطیلی در کاهش میزان پسا، شبیه‌سازی‌ها بر روی هندسه ۱۸ و در سرعت‌های مختلف جریان آزاد از ۱ متر بر ثانیه تا ۱۰ متر بر ثانیه انجام شده است. مقایسه میان اندازه پسای اصطکاکی و فشاری وارد بر سطح ریبلت‌دار در سرعت‌های مختلف جریان آزاد در شکل (١٤) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در سرعت‌های پایین (کمتر از ۵ متر بر ثانیه) گرچه اختلاف اندکی میان دو نوع پسا مشاهده می‌شود اما سهم پسای فشاری اندکی بیشتر از پسای اصطکاکی است. در سرعت‌های بالاتر (بزرگ‌تر از ۵ متر بر ثانیه) سهم پسای اصطکاکی نسبت به پسای فشاری بیشتر شده است.



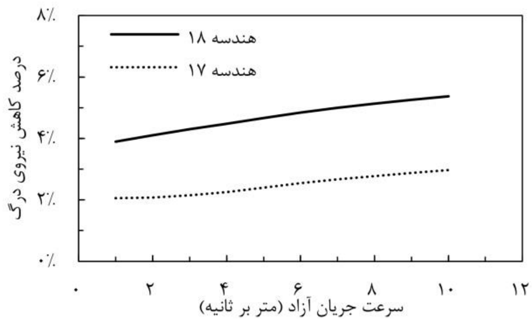
شکل «١٤»: مقایسه سهم پسای اصطکاکی و فشاری وارد بر سطح ریبلت‌دار در سرعت‌های مختلف جریان آزاد در هندسه ۱۸.

پسای کل وارد بر سطح ریبلت‌دار (هندسه ۱۸) در سرعت‌های مختلف جریان آزاد با پسای وارد بر سطح بدون ریبلت متناظر در شکل (۱۵) مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که پسای وارد بر سطح ریبلت‌دار همواره کمتر از پسای وارد بر سطح بدون ریبلت است که این موضوع به‌خوبی نشان‌دهنده عملکرد موفقیت‌آمیز ریبلت‌های مستطیلی در کاهش پسای وارد بر سطح در محدوده رژیم جریان آرام است. برای مشاهده بهتر درصد کاهش پسای وارد بر سطح ریبلت‌دار نسبت به سطح بدون ریبلت در سرعت‌های مختلف جریان آزاد، نمودار درصد کاهش پسا برای دو هندسه ۱۷ و ۱۸ در شکل (١٦) رسم شده است.

مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت جریان آزاد درصد کاهش پسا نیز افزایش می‌یابد. کمترین و بیشترین درصد کاهش پسا در سرعت ۱ و ۱۰ متر بر ثانیه و در هندسه ۱۸ به ترتیب برابر با ۳/۹ و ٥/٤ درصد است. متوسط درصد کاهش پسا در هندسه ۱۷ و ۱۸ و در محدوده سرعت‌های شبیه‌سازی‌شده نیز به ترتیب ۲/۵ و ٤/۷ درصد محاسبه شده است.



شکل «١٥»: مقایسه پسای کل وارد بر سطح ریبلت‌دار (هندسه ۱۸) و سطح بدون ریبلت در سرعت‌های مختلف جریان آزاد.



شکل «١٦»: درصد کاهش پسای کل در سطح ریبلت‌دار نسبت به سطح بدون ریبلت متناظر در هندسه شماره ۱۷ و ۱۸.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر استفاده از ریبلت‌های مستطیلی بر کاهش میزان پسای وارد بر سطح در جریان آرام پرداخته شد. برای این منظور از دینامیک سیّالات محاسباتی در فضای دوبعدی استفاده گردید تا حرکت جریان آب بر روی سطح شبیه‌سازی شود. اثر پارامترهای هندسی ریبلت مستطیلی شامل عرض و ارتفاع و همچنین اثر میزان سرعت جریان آزاد بر روی کاهش پسای وارد بر سطح مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

۱- ریبلت‌های مستطیلی می‌توانند میزان پسای وارد بر سطح را در محدوده رژیم جریان آرام، نسبت به سطح صاف بدون ریبلت، کاهش دهند. درصد کاهش میزان پسا به پارامترهای هندسی ریبلت و سرعت جریان آزاد بستگی دارد.

۲- درحالی‌که ارتفاع ریبلت‌ها اثر ناچیزی در میزان کاهش پسای وارد بر سطح دارند، افزایش عرض ریبلت‌ها تا حد معینی باعث کاهش میزان پسای کل می‌گردد.

۳- بیشترین مقدار کاهش پسا در سطح ریبلت‌دار نسبت به سطح بدون ریبلت، در ریبلت با عرض ٠/٤ میلی‌متر و در سرعت جریان آزاد ۱۰ متر بر ثانیه به دست آمد که برابر با ۸/۷ درصد است.

٤- پسای کل وارد بر سطح بدون ریبلت تنها به دلیل پسای اصطکاکی است اما پسای وارد بر سطح ریبلت‌دار مجموع پسای اصطکاکی و فشاری است.

٥- در سرعت‌های اندک جریان آزاد، سهم پسای فشاری اندکی بیشتر از پسای اصطکاکی وارد بر سطح ریبلت‌دار است اما با افزایش سرعت جریان آزاد به‌تدریج سهم پسای اصطکاکی افزایش‌یافته و بیشتر از پسای فشاری می‌گردد.

٦- با افزایش عرض ریبلت‌های مستطیلی یک لایه برشی داخل ریبلت به وجود می‌آید. این لایه برشی سبب توسعه اغتشاشات در میدان جریان سیّال می‌شود. با افزایش بیش‌ازحد عرض ریبلت‌ها و در نتیجه توسعه لایه برشی، گذار از رژیم جریان آرام به جریان آشفته سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در این صورت حل عددی با استفاده از فرض جریان آرام ناپایدار شده و سرانجام واگرا می‌گردد.

در انتها این نکته لازم به توضیح است که تعیین فرآیند عملکرد ریبلت‌ها در کاهش میزان پسای وارد بر سطح نیاز به بررسی دقیق‌تر دارد. در این پژوهش تلاش شد تا با استفاده از فرضیّات ساده شونده کارآمدی ریبلت‌های مستطیلی در کاهش میزان پسای وارد بر سطح در رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار گیرد.

واژه‌نامه

بال‌واره	Airfoil
پسا	Drag
حل عددی مستقیم	Direct Numerical Simulation
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ	Large Eddy Simulation
فراآبگریز	Superhydrophobic
گردابه‌های سنجاق‌سری	Hairpin vortices
گردابه‌های گاما	ʌ Vortices
محلول فعال سطحی	Surfactant solution
روند حل کاپلد	Coupled algorithm

مراجع

1. Walsh, M.J., "Riblets as a viscous drag reduction technique", *AIAA Journal*, Vol. 21, pp. 485–486, (1983).
2. Walsh, M. and Lindemann, A., "Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction", *In: 22nd Aerospace Science Meeting*, p. 347, (1984).
3. Rowin, W.A., Hou, J. and Ghaemi, S., "Turbulent channel flow over riblets with superhydrophobic coating", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 94, pp. 192–204, (2018).
4. Min, T. and Kim, J., "Effects of hydrophobic surface on skin-friction drag", *Physics of Fluids*, Vol. 16, pp. L55–L58, (2004).
5. Raoufpanah, A., Rad, M. and Nouri, B.A., "Effects of slip condition on the characteristic of flow in ice melting process", *International Journal of Engineering*, Vol. 18, pp. 253–261, (2005).
6. Voronov, R.S., Papavassiliou, D.V. and Lee, L.L., "Slip length and contact angle over hydrophobic surfaces", *Chemical Physics Letters*, Vol. 441, pp. 273–276, (2007).
7. Fu, Y.F., Yuan, C.Q. and Bai, X.Q., "Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces", *Biosurface and Biotribology*, Vol. 3, pp. 11–24, (2017).
8. Suzuki, Y. and Kasagi, N., "Turbulent drag reduction mechanism above a riblet surface", *AIAA Journal*, Vol. 32, pp. 1781–1790, (1994).
9. Kramer, F., Grüneberger, R., Thiele, F., Wassen, E., Hage, W. and Meyer, R., "Wavy riblets for turbulent drag reduction", *In: 5th Flow Control Conference*, p. 4583, (2010).
10. Sareen, A., Deters, R.W., Henry, S.P. and Selig, M.S., "Drag reduction using riblet film applied to airfoils for wind turbines", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 136, pp. 21007, (2014).
11. Hou, J., Hokmabad, B.V. and Ghaemi, S., "Three-dimensional measurement of turbulent flow over a riblet surface", *Experimental and Thermal Fluid Science*, Vol. 85, pp. 229–239, (2017).
12. Ahmmed, K.M.T., Montagut, J. and Kietzig, A., "Drag on superhydrophobic sharkskin inspired surface in a closed channel turbulent flow", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 95, pp. 1934–1942, (2017).
13. Choi, H., Moin, P. and Kim, J., "Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 255, pp. 503–539, (1993).
14. Huang, C., Wang, Q., Wei, J. and Yu, B., "Direct numerical simulation of turbulent flow over wide-rib rectangular grooves", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 96, pp. 1207–1220,

(2018).
15. Huang, C., Liu, D., Wei, J., Yu, B., Zhang, H. and Cheng, J., "Direct numerical simulation of surfactant solution flow in the wide-rib rectangular grooved channel", *AIChE Journal*, Vol. 64, pp. 2898–2912, (2018).
16. Sasamori, M., Iihama, O., Mamori, H., Iwamoto, K. and Murata, A., "Parametric study on a sinusoidal riblet for drag reduction by direct numerical simulation", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 99, pp. 47–69, (2017).
17. Fuaad, P.A. and Prakash, K.A., "Enhanced drag-reduction over superhydrophobic surfaces with sinusoidal textures: A DNS study", *Computers and Fluids*, (2019).
18. Klumpp, S., Meinke, M. and Schröder, W., "Numerical simulation of riblet controlled spatial transition in a zero-pressure-gradient boundary layer", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 85, pp. 57–71, (2010).
19. Bai, X., Zhang, X. and Yuan, C., "Numerical analysis of drag reduction performance of different shaped riblet surfaces", *Marine Technology Society Journal*, Vol. 50, pp. 62–72, (2016).
20. Byun, D. and Park, H.C., "Drag reduction on micro-structured super-hydrophobic surface", In: Robot. Biomimetics, pp. 818–823, (2006).
21. Zhang, Y., Chen, H., Fu, S. and Dong, W., "Numerical study of an airfoil with riblets installed based on large eddy simulation", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 78, pp. 661–670, (2018).
22. Boomsma, A. and Sotiropoulos, F., "Riblet drag reduction in mild adverse pressure gradients: a numerical investigation", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 56, pp. 251–260, (2015).